干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

喀什地区生态脆弱性时空变化及驱动力分析

李　路[1]，　孙桂丽[1,2]，　陆海燕[1]，　卢　航[1]，　史浩伯[1]
（1. 新疆农业大学林学与园艺学院，新疆 乌鲁木齐　830000；2. 干旱区林业生态与产业技术重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830052）

摘　要： 生态脆弱性评价对认识、保护和改造生态环境，促进人与自然的和谐具有重要意义。为了合理利用生态资源，在开发建设中保护环境，故研究喀什地区生态脆弱性时空动态变化，为社会经济与生态保护和谐发展提供科学依据。基于“暴露度-敏感性-恢复力”的评价框架，从自然条件和人为活动方面选取13个指标构建2000—2016年喀什地区生态脆弱性评价指标体系，采用空间主成分方法分析喀什地区生态脆弱性等级的时空变化，并用地理探测器模型分析其驱动因素。结果表明：喀什地区北部区域生态脆弱性高于南部地区，高度脆弱区面积增多且集中在叶尔羌河中下游和喀什噶尔河下游，脆弱性呈现整体增加并向东北方向转移。2000—2016年喀什地区各县市生态脆弱性最低值在塔什库尔干塔吉克自治县，其次为喀什市和泽普县，均属于微度脆弱；最高的是莎车县、伽师县和巴楚县，属于高度脆弱地区。气温、地形和植被覆盖度因素造成喀什地区南北地带生态脆弱性空间分异；耕地面积、牲畜头数的增长引起景观破碎度变大，与区域恶劣的自然环境相互耦合加重了喀什地区的生态脆弱性，导致了喀什地区整体生态环境脆弱性向东北方向扩大。

关 键 词： 生态脆弱性；驱动力分析；空间分异；喀什地区
文章编号：

完好的生态系统能够维持和满足人类生活的多种需求，但是随着社会经济的持续发展，人类对自然资源开发和利用出现了过度和无序的现象，导致许多生态系统退化，继而引发了能源短缺、森林减少、环境污染、生物多样性丧失、水土流失、土地荒漠化等一系列问题[1]。这些问题的产生直接或间接影响了生态系统的内部平衡，加剧了区域生态系统的脆弱性，进一步影响区域的自然环境和社会经济的可持续发展。生态脆弱性是区域生态系统自身固有的属性，是在外界影响因素的干扰下表现出来偏离原来状态的现象[2]。它是人类活动与自然环境相互耦合的结果，从一定程度上能够反映出区域发展的可持续性。从我国学者对生态脆弱性的研究区域来看，学者们关注的区域范围缩小，由原先的典型生态脆弱带等大范围地理单元缩放至具体的行政区域，如甘肃省河西地区、北京市、克拉玛依市、乌鲁木齐市等[3-6]，评价单元日渐精细。在“3S”技术的支持下，研究内容也不断深入，将与生态脆弱性相关的自然和人为因素也纳入其中，如土地覆盖变迁、空间景观格局变化等方面[7-8]，由传统的社会经济数据主导的脆弱性评价发展为多因子参与的综合定量评价与分析。黄莹等[9]以新疆土地资源为研究对象，利用GIS技术对新疆的生态环境进行定量的分析评价，林金煌等[10]基于“成因-结果”模型，从自然、社会、经济3方面选取指标综合分析了闽三角城市群的生态环境脆弱性变化和驱动力。驱动力分析的研究中，主要集中在区域土地变化分析上[11-13]，与生态脆弱性相关的驱动力定量分析研究数量不多。研究方法中地理探测器擅长分析类型变量，它能够有效识别多因子之间的关系，已经在城镇化空间驱动力分析、环境污染演变、贫困地域分析、土壤侵蚀因素分析等方面得到广泛使用并

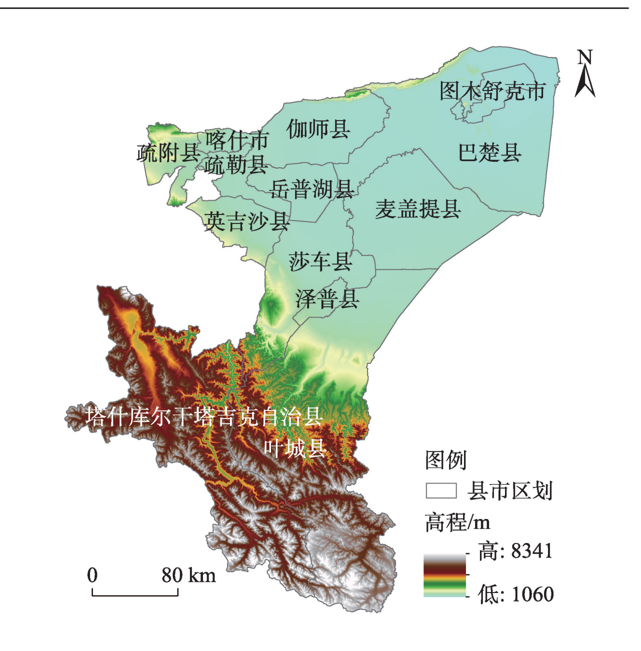
收稿日期： 2019-08-12；　**修订日期：** 2020-08-27
基金项目： 国家自然科学基金（41861046）；国家林业局软科学项目（2016-R25-1）
作者简介： 李路（1996-），男，硕士研究生，研究方向为荒漠化防治学. E-mail: 1459595140@qq.com
通讯作者： 孙桂丽（1979-），女，副教授，从事生态风险评估与荒漠化防治方面研究. E-mail: sxfgl@126.com

取得较好的成果[14-17]，但在区域生态脆弱性驱动力定量分析研究中尚不多见。区域生态脆弱性评价和驱动力分析针对威胁或潜在威胁系统的因素，是了解区域生态系统弱点的有效方法，依据评价结果有助于实现区域社会经济和生态环境和谐发展，实现资源优化配置，绿色发展。

喀什是我国的西大门，区位优势明显，2010年喀什经济开发区辟为中国第6个经济特区[18]，成为中国内陆第一个经济特区，在"一带一路"建设背景下，喀什地区的快速高质量发展对实现新疆经济的跨越式发展具有重要意义。独特的地质地貌环境和气候因素使得该地区生态环境恶劣[19]，加之长期以来人类对资源的过度开发利用，喀什地区绿洲内外面临河流干枯、土地盐渍化、荒漠化等一系列生态环境问题，区域生态环境具有明显的脆弱性。因此，明晰喀什地区的生态脆弱性时空变化对于区域的快速可持续发展，发挥好其生态走廊作用意义重大。目前对喀什地区生态环境脆弱性长时间的动态定量变化研究还比较薄弱，本研究基于"暴露度-敏感性-恢复力"的评价框架，利用"3S"技术，以2000年和2016年遥感影像数据为基础，将景观格局指数与恢复适应性指数相结合，对喀什地区各县市生态脆弱性进行动态评价及驱动力分析，以期为区域生态环境保护与建设，制定合理的生态资源开发利用政策提供理论支撑，为喀什地区的可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

喀什地区在新疆维吾尔自治区的西南方向，三面环山，一面敞开，北有天山南脉横卧，南部相邻昆仑山，西靠帕米尔高原，东临中国最大的沙漠塔克拉玛干沙漠，区域内高程大致由西南向东北降低；平原地区年均气温约12 ℃；喀什地区空气干燥，日照时间长、降水量少，年均降水量在60.1~135.6 mm之间；蒸发量高，年均蒸发量达到2500 mm[20]。根据新疆维吾尔自治区各级行政区划简表，喀什地区包括1市11县(图1)，即喀什市、疏附县、疏勒县、英吉沙县、岳普湖县、伽师县、莎车县、泽普县、叶城县、麦盖提县、巴楚县和塔什库尔干塔吉克自治县，区域内还有图木舒克市(自治区直辖县级市)，区域内国土总面积约1.63×10^5 km^2，总人口约4.63×10^6人[21]，喀什地区是传统的农业大区，是全国最大的区域优质棉花和特



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2556号的标准地图制作，底图无修改。下同。

图1 喀什地区各县市区划示意图

Fig. 1 Indicative compartment of counties in Kashi Prefecture

色林果类红枣、核桃、杏、石榴等的生长产地之一。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源和预处理

研究所采用的数据主要有Landsat卫星影像数据、气象数据、数字高程模型数据(DEM)、社会经济统计数据和其他数据。

卫星影像数据和DEM数据来源于地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)，包括2000年和2016年的喀什地区各县市的影像数据，影像数据条带号为147~150，成像日期选择6—9月之间，图像云量均少于5%，并利用ENVI软件通过一系列图像处理分析，参考国家土地利用现状分类标准[22]，采用一级分类将喀什地区地表覆盖类型分为林地、耕地、草地、建设用地、水域、未利用地6大类，提取了喀什地区2000年和2016年土地覆盖分布类型图，Kappa系数都大于0.7，满足分类精度要求。气象数据包括喀什地区各县市的2000年和2016年的年平均气温、年平均降雨量和≥10 ℃积温栅格数据。其他数据包括喀什地区2000年和2016年的归一化植被指数(NDVI)、国内生产总值(GDP)空间化数据

等，数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn/default.aspx）。社会经济统计数据包括牲畜头数（统计种类为牛、马、驴、猪、山羊和绵羊，单位：10^4头）和人口数量，来自于新疆统计年鉴（2001、2017年）和新疆生产建设兵团统计年鉴（2001、2017年）统计数据。

基于喀什地区土地覆盖分类数据，参考环境保护部发布的生态环境状况评价技术规范[23]，利用喀什地区各县市的生境质量指数来反映地区生态环境发展状况。结合景观生态学方法，以喀什地区各县市林地、耕地、草地、建设用地、水域和未利用地6大类地表类型作为景观单元，利用景观格局分析软件Fragstats 4.2来提取喀什地区不同年份的景观格局指数构建地区景观破碎度指数和景观恢复性指数。植被覆盖度的提取基于NDVI数据，通过像元二分模型在GIS软件中利用栅格计算器计算喀什地区植被覆盖度[24]。由于各个评价指标类型和量纲不统一，不能直接用来评价生态脆弱性，为了减少对喀什地区生态脆弱性评价结果的影响，采用极差标准化方法对收集到的喀什地区各个数据指标进行统一处理[25]。

2.2 研究方法

2.2.1 喀什地区生态脆弱性评价指标体系构建　区域生态系统作为社会与自然相互耦合的复杂系统，区域自然环境状况是生态系统发展的基础条件，是生态系统能否友好可持续发展的根基。综合生态脆弱性方面的相关研究[26-29]，基于“暴露度-敏感性-恢复力”的生态脆弱性评价概念框架[30]，结合喀什地区土地荒漠化、土壤侵蚀等主要生态问题，同时综合考虑数据的时效性与可获取性，最终选取13个评价指标在ArcGIS 10.5中构建图形与属性数据库，构建喀什地区生态脆弱性评价指标体系，见表1。其中利用地形起伏度、坡度来反映喀什地区地形地貌的差异，采用年均降水量、年均气温、≥10 ℃积温反映区域气候水文敏感性。人类社会活动对生态系统的有序发展有直接或间接的影响，生态系统脆弱性的变化与人为活动因素有紧密联系，因此选取了人口密度、耕地面积、牲畜头数、人均GDP等潜在脆弱性因子来反映喀什地区人为活动的影响。地表土地类型的变化直观的反映了人类活动改造自然的过程以及生态系统恢复力的强弱，区域生态系统的适应能力与系统的结构和功能密切相关，区域内景观种类越丰富，并且结构分布连续均匀，其生态系统的稳定性就越高，在遭受到外界强烈干扰它自身的适应能力越强[31-32]，区域的生态系统脆弱性就越低。在Fragstats 4.2软件中利用斑块丰密度指数、香农多样性指数和香农均匀性指数的乘积构建喀什地区各县市的景观恢复性指数；景观破碎度指数能够反映喀什地区景观空间结构的分布在人为活动干扰下的变迁情况，因此用平均斑块面积和斑块个数指数构建景观破碎度指数，进而通过景观破碎度指数、植被覆盖度、生境质量指数、景观恢复性指数定量分析喀什地区生态环境状况和恢复适应性能力。生态环境状况评价技术规范中县级区域

表1　喀什地区生态脆弱性评价指标体系

Tab. 1　Evaluation index system of ecological vulnerability in Kashi Prefecture

目标	框架	因子	指标
	暴露程度	人为干扰	人口密度
			牲畜头数
			耕地面积
			景观破碎度指数
	敏感性	地形状况	地形起伏度
			坡度
喀什地区生态脆弱性		植被状况	植被覆盖度
		气候条件	年均降水量
			年均气温
	恢复适应力	环境因素	生境质量指数
			≥10 ℃积温
			景观恢复性指数
		经济指标	人均GDP

生境质量指数计算公式如下：

$$生境质量指数 = A_{bio} \times \left(\frac{\sum_{i=1}^{6} \beta_i \times M_i}{Z} \right) \quad (1)$$

式中：A_{bio} 为县级生境质量归一化系数(参考值为511.264)；β_i 为第 i 类土地结构类型的权重系数，喀什地区各土地类型权重分别为林地0.35，草地0.21，水域0.28，耕地0.11，建设用地0.04，未利用地0.01；M_i 为区域内第 i 类土地类型的面积；Z 为喀什地区各县区域面积。

2.2.2 喀什地区生态脆弱性指数(EVI)模型构建 利用标准化处理后的上述指标，在ArcGIS 10.5中采用空间主成分析方法[33]，获取生态脆弱性评价指标的主成分个数并利用主成分累加法构建喀什地区2000年和2016年生态脆弱性指数(EVI)函数计算模型，获得喀什地区各县市2期EVI指标。2个时期的部分主成分分析结果如表2所示，为了尽可能多的提取信息，本文选取前4个主成分用来参与喀什地区生态脆弱性评价。由表2可知2000年和2016年的前4个主成分的累积贡献率分别达到了89.64%和88.41%，满足主成分的选择要求。利用栅格计算器工具将各个主成分对应的特征向量与每个指标相乘进行线性求和得到每个主成分的得分，再将每个主成分求和得到喀什地区EVI评价模型，其计算公式如下：

$$EVI_{2000} = F1_{2000} + F2_{2000} + F3_{2000} + F4_{2000} \quad (2)$$

$$EVI_{2016} = F1_{2016} + F2_{2016} + F3_{2016} + F4_{2016} \quad (3)$$

式中：EVI_{2000}、EVI_{2016} 分别为喀什地区2000年和2016年EVI得分；$F1$、$F2$、$F3$、$F4$ 分别为空间主成分模型中不同主成分的得分值。

为了直观的显示喀什地区生态脆弱性等级状况，参考已有研究[34-35]，结合喀什地区生态脆弱性得分值，利用自然间断点方法将喀什地区生态脆弱性程度分为5级，分别为潜在脆弱(EVI≤1.5)：区域生态系统功能完善，遭受到破坏的地方很少，良好发展；微度脆弱(1.5<EVI≤2.1)：区域生态系统结构和功能较为完整，遭受外界干扰后自身易于恢复，生态系统稳定；轻度脆弱(2.1<EVI≤2.7)：区域生态系统轻微遭受外界干扰，生态功能出现受损后恢复速度较慢；中度脆弱(2.7<EVI≤3.1)：区域生态系统遭受干扰程度接近生态阈值，生态功能出现受损且恢复需要长久时间；高度脆弱(3.1<EVI≤3.6)：区域生态系统高度敏感，生态服务功能很低，容易出现生态异常，生态脆弱性很高，需要重点防范。

2.2.3 喀什地区生态脆弱性变化分析 在ArcGIS 10.5中通过区域统计工具计算喀什地区2000年和2016年各县市的EVI平均值和面积转化情况，制作喀什地区脆弱区面积转移矩阵，再利用栅格计算器工具将2000年和2016年EVI数据进行求差运算，分析喀什地区近些年来生态脆弱性程度变化情况，脆弱性指数为负的区域表示生态状况有所改善，数值为正的区域表示生态环境状况有恶化的趋势，根据指标数值将为正的部分采取等间距法进行分级来显示生态脆弱性增加程度。

2.2.4 地理探测器模型 空间分层异质性是地理现象的基本特点之一，地理探测器模型是王劲峰等[36]提出的利用“因子力值”等指标来探测空间分异性和揭示其背后驱动力的一组统计学方法，主要包括单因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测4个部分，模型网址为http://www.geodetector.org。因子探测中 q 值表示自变量指标在多大程度上解释了因变量结果的变化，交互作用探测能够识别各个因子相互叠加对结果的影响。喀什地区各个县市

表2 喀什地区2000年和2016年前7个主成分分析结果

Tab. 2 Results of the first seven principal components analysis in Kashi Prefecture in 2000 and 2016

主成分	2000年			2016年		
	特征值(λ)	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值(λ)	贡献率/%	累计贡献率 /%
1	0.110	50.661	50.661	0.120	49.180	49.180
2	0.053	24.732	75.393	0.053	21.842	71.022
3	0.021	9.793	85.186	0.028	11.470	82.493
4	0.009	4.453	89.640	0.014	5.916	88.410
5	0.009	4.231	93.872	0.013	5.574	93.985
6	0.006	2.829	96.701	0.007	2.886	96.871
7	0.005	2.336	99.038	0.005	2.102	98.973

生态脆弱性指标具有明显的分异性，为了深入分析喀什地区生态脆弱性变化的原因，利用地理探测器模型来探测引起喀什地区生态环境变化的影响因子。分别以2000年和2016年喀什地区EVI之差作为因变量，以不同年份的13个原始指标之差作为自变量，结合研究区范围，在ArcGIS中采用10 km×10 km网格大小分割喀什地区并提取对应的自变量和因变量值，共计提取1108个样本点数据导入地理探测器软件对喀什地区生态脆弱性变化因素进行探测分析。

3　结果与分析

3.1　喀什地区生态脆弱性时空分布变化

喀什地区生态脆弱性等级分布和不同脆弱性面积转化情况如图2、表3所示。分析可知，喀什地区生态脆弱性时空分布差异十分明显。2000年喀什地区各脆弱类型区中，中度脆弱区的面积最大，其占总面积的42.04%，高度脆弱区占比最小为11.30%。高度脆弱区主要分布在莎车县、叶城县的东北部和伽师县的东部地区，潜在脆弱区域为喀什市、泽普县和塔什库尔干塔吉克自治县（塔县）。2016年喀什地区生态脆弱性程度变化明显，区域内以中度脆弱和高度脆弱为主，它们的面积占比分别为25.73%和37.99%，潜在脆弱区只有塔县。近17 a来喀什地区潜在脆弱区、轻度脆弱区、中度脆弱区的面积在减少，中度脆弱区面积减少最多，约减少了18569 km^2；微度脆弱区和高度脆弱区的面积在增加，高度脆弱区面积增加最多，约为30392 km^2，微度脆弱区面积增加不多，约为771.41 km^2。

从脆弱区域面积转移矩阵（表4）可以发现喀什地区不同脆弱性区域之间转化具有显著差异，潜在脆弱区域部分生态环境变差，主要向微度脆弱区转变，转变面积为4002.67 km^2；微度脆弱区域部分既

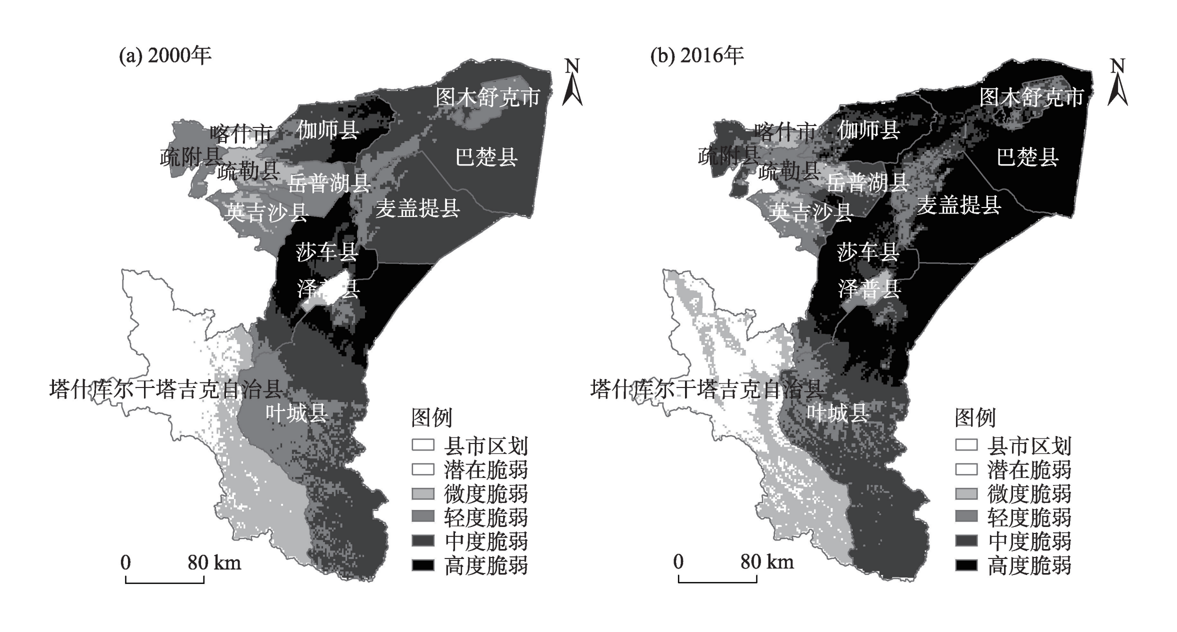


图2　喀什地区生态脆弱性等级分布

Fig. 2　Distribution of ecological vulnerability level in Kashi Prefecture

表3　喀什地区近17 a不同等级脆弱性面积变化情况

Tab. 3　Change of vulnerability areas of different grades in Kashi Prefecture in recent 17 a

脆弱性等级	2000年		2016年		变化比例/%
	面积/km^2	占总面积比/%	面积/km^2	占总面积比例/%	
潜在脆弱区	14995.25	13.17	12464.56	10.94	−2.23
微度脆弱区	13141.51	11.54	13912.92	12.22	+0.68
轻度脆弱区	24999.98	21.95	14936.23	13.12	−8.83
中度脆弱区	47870.73	42.04	29301.77	25.73	−16.31
高度脆弱区	12866.02	11.30	43258.01	37.99	+26.69

表4　喀什地区脆弱区面积相互转换分析

Tab. 4　Analysis of the mutual transformation of vulnerable areas in Kashi Prefecture　/km²

年份	脆弱区等级	2016年				
		潜在脆弱区	微度脆弱区	轻度脆弱区	中度脆弱区	高度脆弱区
2000年	潜在脆弱区	10658.06	4002.67	271.56	51.16	11.8
	微度脆弱区	1782.90	9217.57	2007.24	94.45	39.35
	轻度脆弱区	19.67	657.27	11563.29	12059.19	700.56
	中度脆弱区	3.93	19.67	1039.04	16542.03	30266.06
	高度脆弱区	0.0	15.74	55.1	554.94	12240.24

有向生态系统良好发展的潜在脆弱区转换，恢复区的面积为1782.90 km²，约占微度脆弱区面积的13%，也有2007.24 km²区域发展为轻度脆弱区；而轻度脆弱区中近一半的面积转向了中度脆弱区，转换量为12059.19 km²，还有700.56 km²面积转化为高度脆弱区；中度脆弱区域生态环境进一步恶化变为高度脆弱区，高度脆弱区面积的增加量主要来自中度脆弱区的减少；高度脆弱区生态系统恢复的区域不多，少部分转向了中度脆弱区，转换面积仅为554.94 km²。

总体来看，近17 a内喀什地区总体生态脆弱性变高，区域内环境压力变大，主要集中在东北部的叶尔羌河流域附近的县市和东部的塔克拉玛干沙漠边缘，叶城县、麦盖提县和巴楚县区域部分土地紧邻沙漠边缘，气候极度干燥，植物稀疏，风沙较大，环境恶劣，主要是自然因素导致区域生态脆弱性高。而流域内是农用地集中区域，受经济影响耕地增长速度快，巴楚县、图木舒克市、麦盖提县、莎车县等县市耕地面积扩张速度位于前列。耕地的大范围扩张加重了流域附近植被退化，生态系统干扰程度增大，同时灌区内农田用水增多，大水漫灌等不合理灌溉方式和排水系统，消耗了大量水资源，造成部分支流干枯，土地盐碱化加重，区域生态脆弱性增高。

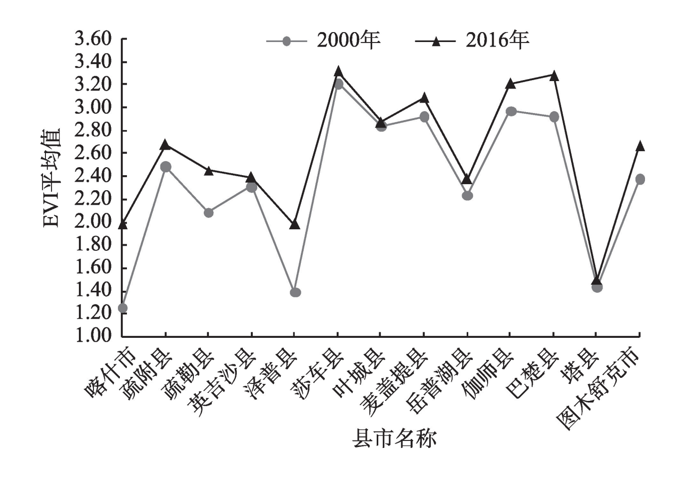


图3　2000年和2016年各县市生态脆弱性指数(EVI)平均值

Fig. 3　Average ecological vulnerability index of counties and cities in 2000 and 2016

3.2　喀什地区生态脆弱性变化趋势分析

喀什地区各县市的EVI平均值如图3所示，2000年和2016年喀什地区各县市EVI均值在1.20~3.40之间，2000年整个喀什地区EVI的平均值为2.34，而2016年为2.60，从喀什地区整体平均值指标和不同年份各县市的EVI情况来看，喀什地区生态状况有所恶化，脆弱性指数上升幅度较大的城市为喀什市、疏勒县、泽普县和巴楚县。

喀什地区多年脆弱性等级平均得分如图4所示，近17 a内喀什地区各县市EVI多年平均值中，最小的是塔县为1.47，其次为喀什市(1.62)和泽普县(1.68)，属于微度脆弱区；最大的为莎车县，其值为3.27，伽师县和巴楚县紧随其后，达到了3.10，均属于高度脆弱区；其他县的生态脆弱性多年平均值在2.50左右，属于轻度脆弱区，叶城县的偏高为2.86，

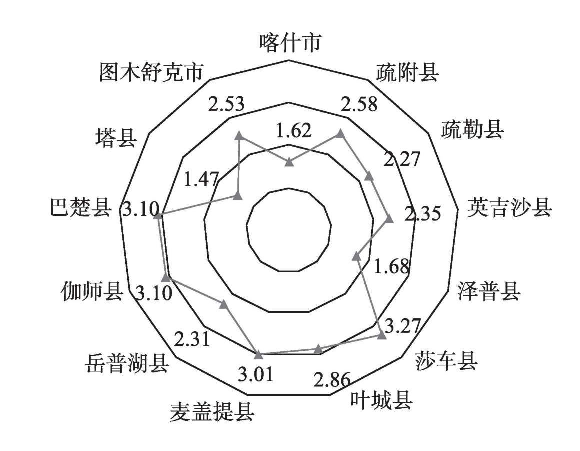


图4　多年来喀什地区各县市EVI平均值

Fig. 4　Average ecological vulnerability index of counties and cities in Kashi Prefecture over the years

属于中度脆弱区。

喀什地区整体生态脆弱性变化趋势结果如图5所示。近17 a来喀什地区EVI最大差值为2.11，最小值为-1.35，脆弱性指数为负的生态恢复区主要集中在岳普湖县、英吉沙县、麦盖提县、伽师县、莎车县和叶城县南部山区。喀什地区EVI增加明显的是喀什市以北区域和泽普县的西南部，其他区域变化不显著，生态脆弱性在原有基础上增加，总体来看喀什地区EVI增加的面积大于减少的面积，喀什地区北部县市周围生态环境质量呈现恶化趋向。

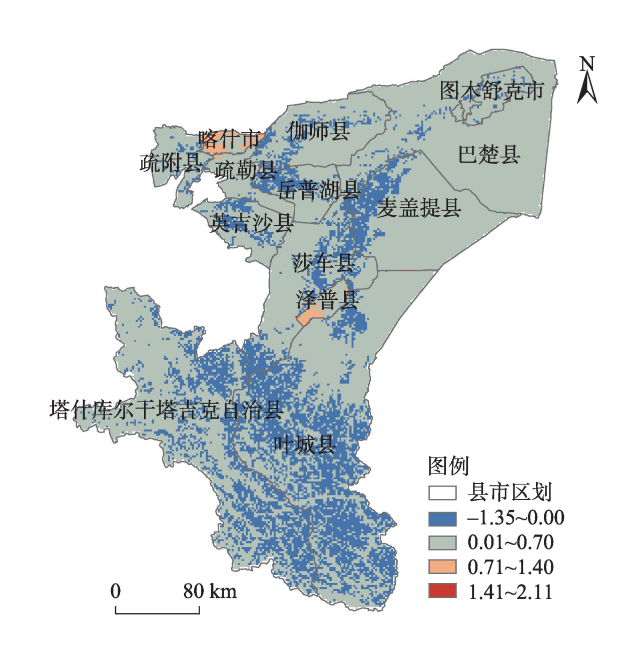


图5　2000—2016年喀什地区EVI变化分布图

Fig. 5　Distribution of ecological vulnerability index in Kashi Prefecture from 2000 to 2016

3.3　喀什地区生态脆弱性变化驱动力分析

地理探测器单因子探测结果显示各个指标对喀什地区生态脆弱性变化的解释力的大小具有差异，q值由大到小依次为10 °C以上积温(0.248)、景观破碎度指数(0.241)、坡度(0.195)、年均降水量(0.188)、地形起伏度(0.183)、耕地面积(0.174)、牲畜头数(0.171)、生境质量指数(0.155)、年均气温(0.076)、景观恢复性指数(0.057)、人口密度(0.017)、植被覆盖度(0.013)、人均GDP(0.002)。从影响力q值来看，作为自然环境与人类社会相互耦合形成的复杂系统，喀什地区生态系统脆弱性变化涉及的因素较多，没有突出的单一决定性指标来解释喀什地区生态脆弱性的变化。整体来看，自然环境指标10 °C以上积温、坡度、年均降水量、地形起伏度，以及与人为活动有关的景观破碎度指数、耕地面积、牲畜头数、生境质量指数8个指标对喀什地区2000—2016年EVI的变化影响较大，其他指标对喀什地区生态脆弱性解释程度较低。

指标之间交互作用对喀什地区生态脆弱性变化的影响，按照影响力q值的大小可以分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强5种情况，非线性增强类型对生态脆弱性的变化具有最强的影响作用。探测表明喀什地区各个指标相互交互作用类型主要分为双因子增强和非线性增强2种情况，说明了两两因子交互产生的作用均大于单因子对生态脆弱性的影响。指标交互作用为非线性增强关系有22对，如表5所示。其中年均气温和景观破碎度交互对喀什地区EVI变化具有最强的增强作用，同时年均气温在和区域生境质量、年均降水量、耕地面积、牲畜头数相互协同下也表现出较强的影响力，虽然单因子探测结果显示年均气温对喀什地区生态脆弱性的变化影响较小，但是它与景观破碎度指数和生境质量指数相结合时，对喀什地区生态脆弱性的变化具有较大影响力。综合来看，在两两指标交互作用中，耕地面积、牲畜头数、生境质量指数的变化与区域脆弱的环境气候相互耦合加重了喀什地区的生态脆弱性。

综合因子探测和交互作用探测可以发现，气温、地形、植被覆盖度因素造成喀什地区南北地带生态脆弱性空间分异，喀什地区西南部城市塔县和南部叶城县山区属于高海拔地带，区域平均海拔约为4126 m，促进农业生长的有效积温小，地形起伏大，坡度陡，自然环境因素决定了区域内人为干扰程度低，生态脆弱性低于喀什地区北部和东北部的县市。另一方面，喀什地区北部县市人为活动引起的耕地面积和牲畜头数的增长，减少了植被覆盖度，增大地区内景观破碎度，降低了区域生境质量，加重了地区生态环境脆弱性，导致了喀什地区整体生态脆弱性向东北方向扩大的趋势。从喀什地区各县市EVI变化强度以及主要指标变化情况来看(图6)，喀什市和泽普县脆弱性指数变化强度居于前列，由生态环境良好的潜在脆弱区变为微度脆弱区。2000—2016年内喀什市耕地数量增长不明显，而牲畜头数的增长量居于首位，为3.73×10^5头，快速扩张的畜牧业与饲草料用地不足的矛盾加重了喀

表5　主要指标之间交互作用

Tab. 5　Interaction between key indicators

交互类型	q值	交互类型	q值
生境质量指数∩植被覆盖度	0.196	牲畜头数∩植被覆盖度	0.200
生境质量指数∩年均气温	0.331	牲畜头数∩年均气温	0.274
生境质量指数∩景观恢复性	0.234	牲畜头数∩人口密度	0.191
耕地面积∩植被覆盖度	0.207	牲畜头数∩人均GDP	0.176
耕地面积∩年均气温	0.300	植被覆盖度∩年均降水量	0.213
耕地面积∩人口密度	0.205	植被覆盖度∩年均气温	0.116
耕地面积∩景观恢复性	0.256	植被覆盖度∩景观恢复性	0.085
耕地面积∩人均GDP	0.178	植被覆盖度∩人口密度	0.016
景观破碎度∩植被覆盖度	0.263	植被覆盖度∩地形起伏度	0.199
景观破碎度∩年均气温	0.362	植被覆盖度∩10 ℃以上积温	0.164
年均降水量∩年均气温	0.301	植被覆盖度∩坡度	0.215

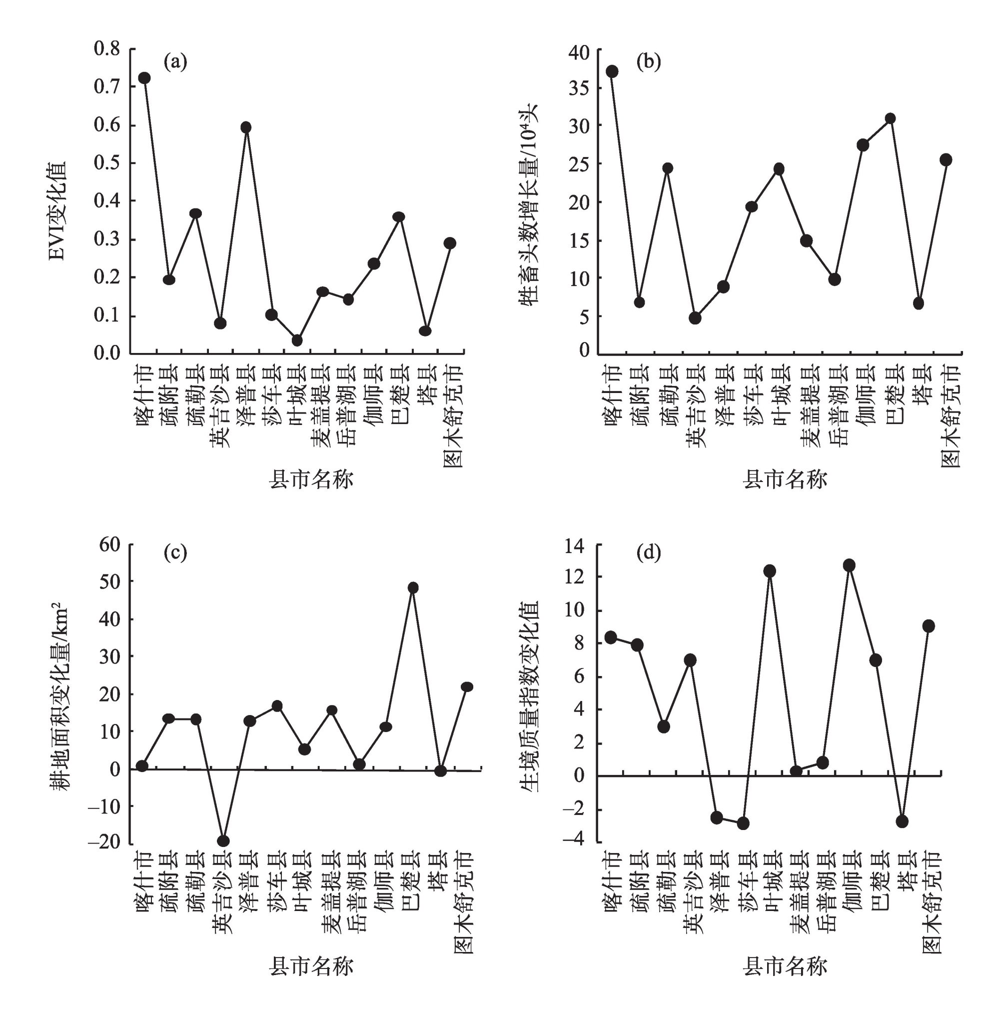


图6　各县市生态脆弱性平均指数、牲畜头数、耕地面积和生境质量指数变化情况

Fig. 6　Changes of ecological vulnerability index, number of livestock, cultivated land area and habitat quality index in each cities

什市生态脆弱性；泽普县生境质量指数下降幅度较大，引起泽普县西南部脆弱性指数变化明显。巴楚县脆弱性升高是牲畜头数和耕地面积的快速扩张造成的，巴楚县2000—2016年内耕地面积增长数量为48840 hm^2，牲畜头数增加量为3.10×10^5头，其在耕地面积和牲畜头数增长速度均位于前列，农业用水需求量大加上草场过牧现象十分严重[37]，不合理的人为活动致使巴楚县部分中度脆弱区恶化为高

度脆弱区。而英吉沙县内耕地面积的减少和生境质量指数的提高，植被覆盖度得到提升，减少了区域内生态压力，其整体EVI增长较慢，生态环境较为稳定。因此，喀什地区中高度脆弱性区域，在城镇化进程的同时应当因地制宜合理安排土地资源，树立生态优先、绿色发展理念，同时采取封地育林育草等措施提升脆弱区内植被覆盖率，重点防止人为破坏，保护区内生境质量，修复脆弱生态环境。

4 结 论

基于"暴露度-敏感性-恢复力"的评价框架，将土地覆盖景观格局指数与适应性指数相结合，选取了13个能反映喀什地区自然社会生态系统发展的指标，构建喀什地区生态脆弱性评价体系，利用"3S"技术，获得喀什地区2000—2016年内生态脆弱性等级时空变化，并利用地理探测器模型分析生态脆弱性变化的驱动力，结论如下：

（1）生态脆弱性时空分布变化上来看，喀什地区北部平原区域EVI的平均值高于南部山区EVI，喀什地区轻度和中度脆弱区面积在减少，高度脆弱区面积在增加，高度脆弱区面积的增加量主要来自中度脆弱区。近17 a间喀什地区整体生态脆弱性在原有基础上呈现恶化并向东北方向转移的趋势，集中在叶尔羌河中下游流域和喀什噶尔河下游区域。

（2）从EVI变化情况来看，EVI上升幅度较大的城市为喀什市、疏勒县、泽普县和巴楚县，而EVI下降的生态恢复区主要分布在岳普湖县、麦盖提县、英吉沙县、伽师县等城市中心周围区域。2000—2016年内喀什地区各县市EVI最小的是塔什库尔干塔吉克自治县，其次为喀什市和泽普县，均属于微度脆弱地区；最大的是莎车县、伽师县和巴楚县，均属于高度脆弱区。

（3）驱动力分析上，喀什地区生态系统脆弱性变化涉及的因素较多，没有突出的单一决定性指标来解释喀什地区生态脆弱性的变化。总体来看，气温、地形和植被覆盖度因素造成喀什地区南北地带生态脆弱性空间分异，同时人为活动引起的耕地面积和牲畜头数的增长，减少了植被覆盖，造成地表景观破碎度变大，区域生境质量降低。不合理的人为活动与区域恶劣的自然环境相互耦合加重了喀什地区的生态脆弱性，导致了喀什地区整体生态环境脆弱性向东北方向扩大。

区域生态环境脆弱性评价已成为当前研究的热点问题之一，区域生态脆弱性作为自然环境与人为活动相互作用而形成的特殊属性，须整合多源数据作为区域生态脆弱性分析研究的数据支撑[38-39]。区域生态系统脆弱性的评价涉及指标众多，虽然通过地理探测器模型分析出了与喀什地区生态脆弱性变化有关的主要指标，但是这些指标对喀什地区各个县市影响的具体程度、恢复方法和机制还需要深入研究。本研究动态评价了喀什地区2000—2016年内生态脆弱性的变化趋势和变化原因，对未来喀什地区在发展经济的同时，做到保护和恢复地方生态环境具有指导参考意义。

参考文献（References）

[1] 徐君, 李贵芳, 王育红. 生态脆弱性国内外研究综述与展望[J]. 华东经济管理, 2016, 30(4): 149-162. [Xu Jun, Li Guifang, Wang Yuhong. Review and prospect of domestic and foreign research on ecological vulnerability[J]. East China Economic Management, 2016, 30(4): 149-162.]

[2] Moertberg U M, Balfors B, Knol W C. Landscape ecological assessment: A tool for integrating biodiversity issues in strategic environmental assessment and planning[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 82(4): 457-470.]

[3] 周苏娥, 张明军, 王圣杰, 等. 甘肃省河西地区自然-社会系统脆弱性评价[J]. 资源科学, 2018, 40(2): 452-462. [Zhou Su'e, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Vulnerability assessment of natural-social system in Hexi region of Gansu Province[J]. Resource Science, 2018, 40(2): 452-462.]

[4] 颜磊, 许学工, 谢正磊, 等. 北京市域生态敏感性综合评价[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3117-3125. [Yan Lei, Xu Xuegong, Xie Zhenglei, et al. Comprehensive evaluation of regional ecological sensitivity in Beijing[J]. Journal of Ecology, 2009, 29(6): 3117-3125.]

[5] 潘峰, 田长彦, 邵峰, 等. 新疆克拉玛依市生态敏感性研究[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1497-1507. [Pan Feng, Tian Changyan, Shao Feng, et al. Study on ecological sensitivity of Karamay City in Xinjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(11): 1497-1507.]

[6] 刘萍, 李园园. 基于RS和GIS的乌鲁木齐市城市绿地景观评价研究[J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(4): 56-59. [Liu Ping, Li Yuanyuan. Research on urban greenbelt landscape evaluation of Urumqi City based on RS and GIS[J]. Journal of South China Agricultural University, 2007, 28(4): 56-59.]

[7] 王钰, 胡宝清. 西江流域生态脆弱性时空分异及其驱动机制研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(7): 947-956. [Wang Yu, Hu Baoqing. Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability of Xijiang River in Guangxi and its driving mechanism

based on GIS[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(7): 947−956.]

[8] 王一航, 夏沛, 刘志锋, 等. 中国绿洲城市土地利用/覆盖变化研究进展[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 341−353. [Wang Yihang, Xia Pei, Liu Zhifeng, et al. Research progress of land use/cover change in oasis cities in China[J]. Arid Land Geography, 2019, 42 (2): 341−353.]

[9] 黄莹, 包安明, 刘海隆, 等. 基于景观格局的新疆生态脆弱性综合评价研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 261−266. [Huang Ying, Bao Anming, Liu Hailong, et al. Comprehensive evaluation of ecological vulnerability in Xinjiang based on landscape pattern[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(3): 261−266.]

[10] 林金煌, 胡国建, 祁新华, 等. 闽三角城市群生态环境脆弱性及其驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4155−4166. [Lin Jinhuang, Hu Guojian, Qi Xinhua, et al. Ecological environmental vulnerability and its driving forces in urban agglomeration in the Fujian delta region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4155−4166.]

[11] 熊杰, 曾源, 朱亮, 等. 近25年三峡库区土地覆被变化及驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10): 2368−2378. [Xiong Jie, Zeng Yuan, Zhu Liang, et al. Analysis of land cover change and driving force in the Three Gorges Reservoir Area in the past 25 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(10): 2368−2378.]

[12] 阿如旱, 都来, 盛艳, 等. 基于Logistic回归模型的内蒙古多伦县土地沙漠化驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 137−143. [Aruhan, Du Lai, Sheng Yan, et al. Driving force analysis of land desertification in Duolun County of Inner Mongolia based on logistic regression model[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 137−143.]

[13] 周松秀, 田亚平, 刘兰芳. 南方丘陵区农业生态环境脆弱性的驱动力分析——以衡阳盆地为例[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 938−944. [Zhou Songxiu, Tian Yaping, Liu Lanfang. Driving force analysis of agricultural eco-environmental vulnerability in southern hilly areas: A case study of Hengyang Basin[J]. Progress in Geography, 2011, 30(7): 938−944.]

[14] 蔡芳芳, 濮励杰. 南通市城乡建设用地演变时空特征与形成机理[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 731−740. [Cai Fangfang, Pu Lijie. Spatial and temporal characteristics and formation mechanism of urban and rural construction land evolution in Nantong City[J]. Resource Science, 2014, 36(4): 731−740.]

[15] 郭春颖, 施润和, 周云云, 等. 基于遥感与地理探测器的长江三角洲空气污染风险因子分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 26(11): 1805−1814. [Guo Chunying, Shi Runhe, Zhou Yunyun, et al. Risk factor analysis of air pollution in Yangtze River Delta based on remote sensing and geographic detector[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 26(11): 1805−1814.]

[16] 刘小鹏, 王可, 叶均艳, 等. 宁夏水贫困地域分异的WPI-Geodetector测度与分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(1): 160−169. [Liu Xiaopeng, Wang Ke, Ye Junyan, et al. WPI-Geodetector measurement and analysis of regional differentiation of water poverty in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(1): 160−169.]

[17] 王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1674−1686. [Wang Huan, Gao Jiangbo, Hou Wenjuan. Quantitative attribution of soil erosion in different Karst landforms based on geographic detector[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(9): 1674−1686.]

[18] 曾鹏, 蒋团标, 廉超. 新疆喀什经济特区跨跃式发展战略研究[J]. 经济地理, 2012, 32(6): 15−20. [Zeng Peng, Jiang Tuanbiao, Lian Chao. Research on the leap-forward development strategy of Xinjiang Kashgar Special Economic Zone[J]. Economic Geography, 2012, 32(6): 15−20.]

[19] 高瑜莲, 柳锦宝, 柳维扬, 等. 近14 a新疆南疆绿洲地区地表蒸散与干旱的时空变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 830−837. [Gao Yulian, Liu Jinbao, Liu Weiyang, et al. Spatio-temporal variation characteristics of evapotranspiration and drought at the oasis area of the south Xinjiang in recent 14 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 830−837.]

[20] 谢培, 顾艳玲, 张玉虎, 等. 1961—2015年新疆降水及干旱特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 332−339. [Xie Pei, Gu Yanling, Zhang Yuhu, et al. Precipitation and drought characteristics in Xinjiang during 1961—2015[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 332−339.]

[21] 国家统计局喀什调查队. 喀什地区2018年国民经济和社会发展统计公报[N]. 喀什日报(汉), 2019-05-01(5). [Kashgar Investigation Team of National Bureau of Statistics. Statistical bulletin on national economic and social development in Kashgar in 2018[N]. Kashgar Daily, 2019-05-01(5).]

[22] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21010—2017土地利用现状分类国家标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [China National Standardization Management Committee. GB/T 21010—2017 National standard for classification of land use status[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2017.]

[23] 环境保护部. 中华人民共和国国家环境保护标准 HJ-192-2015-生态环境状况评价技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015. [Ministry of Environmental Protection. National environmental protection standard of the People's Republic of China technical specification for assessment of ecological environment, HJ-192-2015[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015.]

[24] 赵明伟, 王妮, 施慧慧, 等. 2001—2015年间我国陆地植被覆盖度时空变化及驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 324−331. [Zhao Mingwei, Wang Ni, Shi Huihui, et al. Analysis of temporal and spatial changes and driving forces of land vegetation coverage in China from 2001 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2): 324−331.]

[25] 张立军, 袁能文. 线性综合评价模型中指标标准化方法的比较与选择[J]. 统计与信息论坛, 2010, 25(8): 11−16. [Zhang Lijun, Yuan Nengwen. Comparison and selection of index standardization methods in linear comprehensive evaluation model[J]. Statistics & Information Forum, 2010, 25(8): 11−16.]

[26] 周自翔, 李晶, 任志远. 基于GIS的关中−天水经济区地形起伏度与人口分布研究[J]. 地理科学, 2012, 32(8): 23−27. [Zhou Zixiang, Li Jing, Ren Zhiyuan. Study of topographic fluctuation and population distribution in Guanzhong-Tianshui Economic Zone based on GIS[J]. Geographical Science, 2012, 32(8): 23−27.]

[27] 姚俊强, 杨青, 毛炜峄, 等. 气候变化和人类活动对中亚地区水文环境的影响评估[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 222−230. [Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Assessment of impacts of climate change and human activities on hydrological environment in Central Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 222−230.]

[28] 鄂子骥, 阿里木江·卡斯木, 买买提江·买提尼亚孜, 等. 基于网格单元的西北干旱区城市土地覆被/土地利用时空变化研究——以新疆喀什市为例[J]. 干旱区地理, 2018, 41(3): 625−633. [Yue Ziji, Alimujiang Casmu, Maimaitijiang Maitiyazi, et al. Spatial and temporal changes of urban land cover and land use in arid area of northwest China based on grid unit: A case study of Kashi City, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(3): 625−633.]

[29] 莫丰瑞, 楚新正, 马晓飞, 等. 景观格局变化下艾比湖湿地防风固沙功能及其价值评估[J]. 生态科学, 2017, 36(6): 195−206. [Mo Fengrui, Chu Xinzheng, Ma Xiaofei, et al. Function and value evaluation of wind and sand fixation of Ebinur wetland under the change of landscape pattern[J]. Ecological Science, 2017, 36(6): 195−206.]

[30] De Lange H J, Sala S, Vighi M, et al. Ecological vulnerability in risk assessment: A review and perspectives[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(18): 3871−3879.

[31] 孙才志, 闫晓露, 钟敬秋. 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 247−257. [Sun Caizhi, Yan Xiaolu, Zhong Jingqiu. Landscape pattern vulnerability and spatial correlation pattern in Lower Liaohe Plain[J]. Journal of Ecology, 2014, 34(2): 247−257.]

[32] 邱彭华, 徐颂军, 谢跟踪, 等. 基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析[J]. 生态学报, 2006, 27(4): 333−342. [Qiu Penghua, Xu Songjun, Xie Genzong, et al. Analysis of ecological vulnerability in western Hainan based on landscape patterns and ecological sensitivity[J]. Journal of Ecology, 2006, 27(4): 333−342.]

[33] Zou T H, Yoshino, K. Environmental vulnerability evaluation using a spatial principal components approach in the Daxing'anling region, China[J]. Ecological Indicators, 2017, 78: 406−414.

[34] 朱琪, 周旺明, 贾翔, 等. 长白山国家自然保护区及其周边地区生态脆弱性评估[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1633−1641. [Zhu Qi, Zhou Wangming, Jia Xiang, et al. Ecological vulnerability assessment of Changbai Mountain National Nature Reserve and its surrounding areas[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1633−1641.]

[35] 田超, 杨夏捷, 鞠园华, 等. 吉林省西部地区生态脆弱性的动态评价[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 298−303. [Tian Chao, Yang Xiajie, Ju Yuanhua, et al. Dynamic assessment of ecological vulnerability in western Jilin Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 298−303.]

[36] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116−134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116−134.]

[37] 巴特尔. 转变观念, 发挥优势, 推进农区畜牧产业健康发展: 对巴楚县农区养殖业饲草料短缺问题的调查[J]. 新疆畜牧业, 2015(5): 6−8,12. [Barter. Change concept, give full play to advantages, and promote the healthy development of animal husbandry in agricultural areas: An investigation on the shortage of forage in the farming area of Bachu County[J]. Xinjiang Animal Husbandry, 2015(5): 6−8, 12]

[38] 张学玲, 余文波, 蔡海生, 等. 区域生态环境脆弱性评价研究综述[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5970−5981. [Zhang Xueling, Yu Wenbo, Cai Haisheng, et al. Review of regional eco-environmental vulnerability assessment[J]. Journal of Ecology, 2018, 38(16): 5970−5981.]

[39] 郭兵, 孔维华, 姜琳. 西北干旱荒漠生态区脆弱性动态监测及驱动因子定量分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 412−424. [Guo Bing, Kong Weihua, Jiang Lin. Dynamic monitoring of vulnerability and quantitative analysis of driving factors in arid desert eco-region of northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 412−424.]

Spatial-temporal variation and driving forces of ecological vulnerability in Kashi Prefecture

LI Lu[1], SUN Guili[1,2], LU Haiyan[1], LU Hang[1], SHI Haobo[1]

(1. College of Forestry and Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
2. Key Laboratory of Forestry Ecology and Industrial Technology in Arid Areas, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: Ecological vulnerability assessment is of great significance to understand, protect, and transform the ecological environment and promote harmony between mankind and nature. To make rational use of ecological resources and protect the environment from the negative effects of development and construction, we study the temporal and spatial dynamic changes of ecological vulnerability in Kashi Prefecture, Xinjiang, China during 2000—2016. The study could provide a scientific basis for the economic and ecological protection and harmonious development of Kashi Prefecture. Based on the framework of "exposure-sensitivity-resilience", for this study, we selected 13 indicators from natural and human aspects to construct an evaluation system to measure the ecological vulnerability in Kashi Prefecture during 2000—2016. Spatial principal component analysis was used to analyze the changes in the ecological vulnerability of Kashi Prefecture, and a geographic detector model was used to analyze the driving factors of these changes. The results of the analysis showed that the ecological vulnerability of the northern part of Kashi Prefecture was higher than that of the southern part. High vulnerability areas were increased and concentrated in the middle and lower reaches of the Yarkant River and the lower reaches of the Kashgar River. Vulnerability showed an overall increase and shifted to the northeast of the prefecture. During the study period, the lowest ecological vulnerability value among various counties and cities in Kashi Prefecture was obtained in the Taxkorgan Tajik Autonomous County. The Kashi and Zepu counties were observed to be slightly vulnerable; the highest values were obtained for the Shache, Jiashi, and Bachu counties, which belong to highly vulnerable areas. Factors such as temperature, topography, and vegetation coverage caused the spatial differentiation of ecological vulnerability in the northern and southern parts of Kashi Prefecture. An increase in the cultivated land area, livestock head, and landscape fragmentation aggravated the ecological vulnerability of Kashi Prefecture. This aggravation was coupled with the harsh natural environment in some areas; these factors led to the expansion of the overall ecological vulnerability of Kashi Prefecture to the northeast.

Key words: ecological vulnerability; driving force analysis; spatial differentiation; Kashi Prefecture